

Ejemplo de Balance Macroscópico de Energía Térmica (Quemador de azufre)

En cierta planta industrial, para la producción de dióxido de azufre con oxígeno gaseoso puro, se enfría el SO₂ producido hasta 150 °C, esto con la finalidad de mantener la temperatura del dióxido de azufre a la salida del quemador en 740 °C, ya que se recircula parte del mismo al quemador. El dióxido de azufre producto de la combustión es enfriado en un intercambiador de calor que se alimenta de una corriente de agua líquida a 80 °C y que produce vapor de agua a 150 °C. Calcule los flujos másicos de todas las corrientes en el proceso considerando que todos los reactores son adiabáticos y que se alimenta al quemador 10 kg de S líquido por minuto con la cantidad estequiométrica de O₂ requerida. Considere que la reacción tiene una eficiencia del 100 %. Observe el arreglo presentado en la Figura 1 como referencia del proceso.

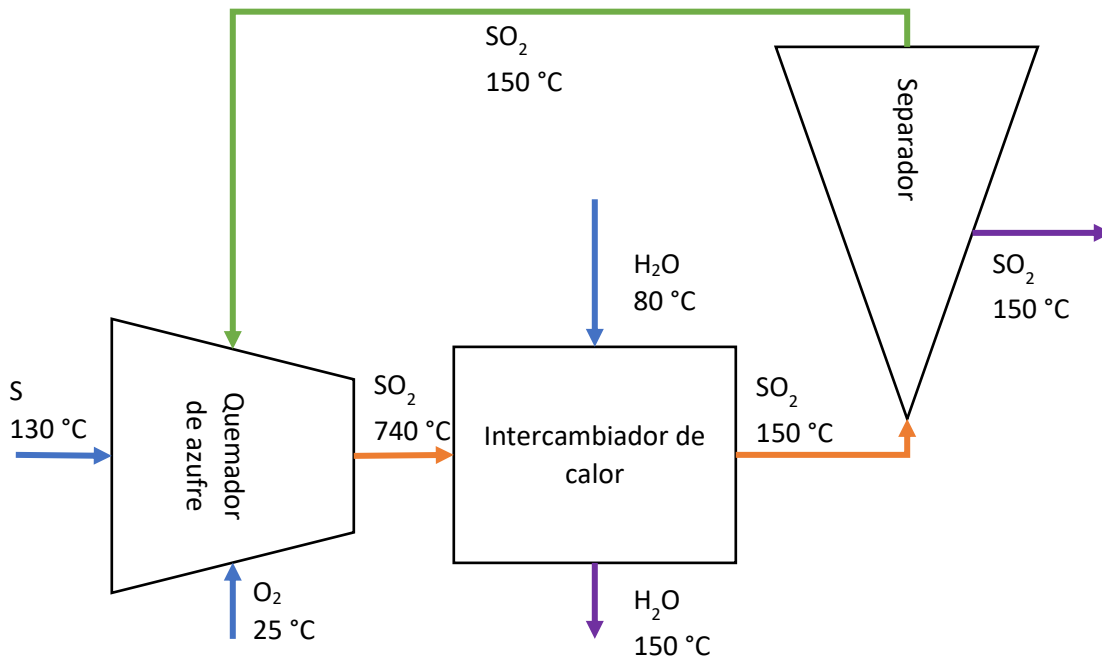
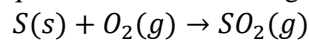


Figura 1.- Esquema del proceso de producción de SO₂.

En el quemador de azufre, consideré que se lleva a cabo la siguiente reacción de combustión:



Datos:

$$\Delta H_{f,S(s)}^0 = 0 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$$

$$\Delta H_{f,O_2(g)}^0 = 0 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$$

$$\Delta H_{f,SO_2(g)}^0 = -70.94 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$$

$$\lambda_{m,S} = 0.40 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \quad @ \quad 119^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{t,S,\alpha \rightarrow \beta} = 0.096 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \quad @ \quad 95.5^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{b,H_2O} = 40.65 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad @ \quad 100^\circ\text{C}$$

$$Cp_{S(s),\alpha} = Cp_{S(s),\beta} = 0.71 \frac{\text{J}}{\text{gK}}$$

$$Cp_{S(l)} = 107.5 - 0.2294 T - 4992000 T^{-2} + 0.0001451 T^2 \frac{\text{cal}}{\text{molK}}$$

$$Cp_{SO_2(g)} = 10.38 + 0.00254 T - 142000 T^{-2} \frac{\text{cal}}{\text{molK}}$$

$$Cp_{H_2O(l)} = 18.03 \frac{\text{cal}}{\text{molK}}$$

$$Cp_{H_2O(g)} = 7.17 + 0.00256 T + 8000 T^{-2}$$

Conversión de unidades de los datos:

$$Cp_{S(s),\alpha} = Cp_{S(s),\beta} = 0.71 \frac{\text{J}}{\text{gK}} \left(\frac{1 \text{ cal}}{4.184 \text{ J}} \right) \left(\frac{32.065 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \right) = 5.441 \frac{\text{cal}}{\text{molK}}$$

$$\lambda_{b,H_2O} = 40.65 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \left(\frac{1 \text{ kcal}}{4.184 \text{ kJ}} \right) = 9.715 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \quad @ \quad 100^\circ\text{C}$$

Solución:

Comencemos por definir el sistema y colocar todos los datos conocidos del proceso.

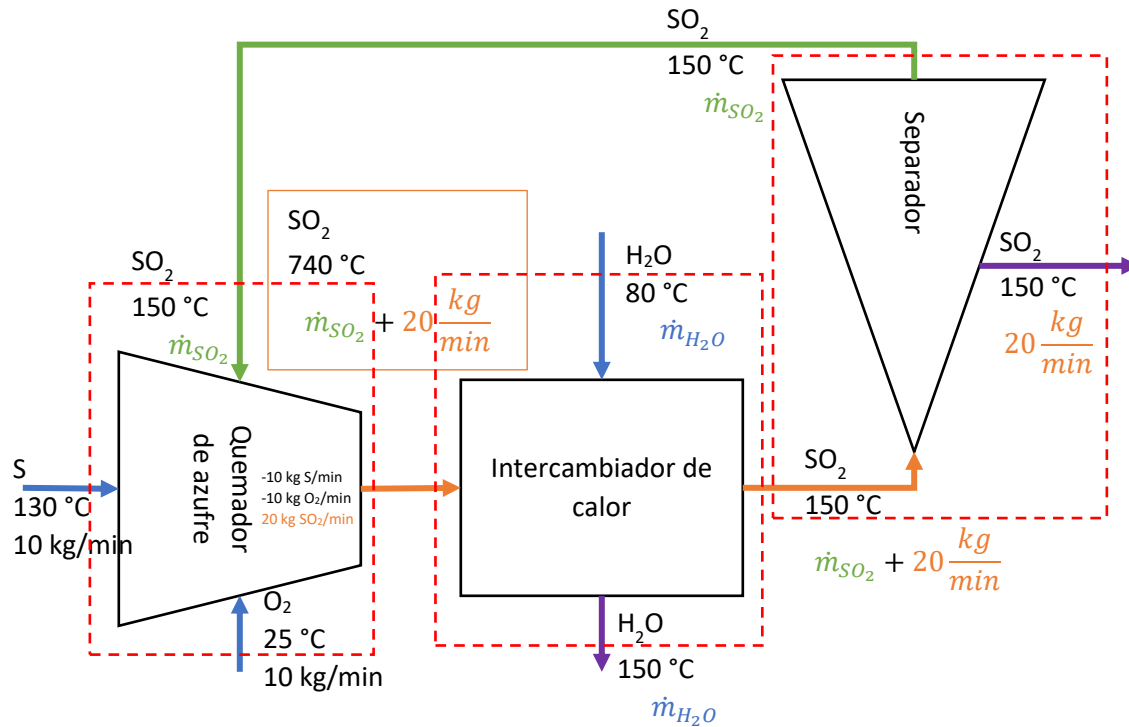


Figura 2.- Esquema del proceso con todos los datos conocidos.

Conocemos también los términos fuente del proceso, ya que sabemos el flujo de S y que la reacción tiene una eficiencia del 100%.

$$G_{S,RxN} = -10 \frac{\text{kg S}}{\text{min}}$$

$$G_{O_2,RxN} = -10 \frac{\text{kg S}}{\text{min}} \left(\frac{1 \text{ kg mol S}}{32 \text{ kg S}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg mol O}_2}{1 \text{ kg mol S}} \right) \left(\frac{32 \text{ kg O}_2}{1 \text{ kg mol O}_2} \right) = -10 \frac{\text{kg O}_2}{\text{min}}$$

$$G_{SO_2,RxN} = 10 \frac{\text{kg S}}{\text{min}} \left(\frac{1 \text{ kg mol S}}{32 \text{ kg S}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg mol SO}_2}{1 \text{ kg mol S}} \right) \left(\frac{64 \text{ kg SO}_2}{1 \text{ kg mol SO}_2} \right) = 20 \frac{\text{kg SO}_2}{\text{min}}$$

Una vez que colocamos todos los datos conocidos, podemos plantear el balance de energía térmica para conocer los flujos másicos que desconocemos.

En el caso del quemador de azufre:

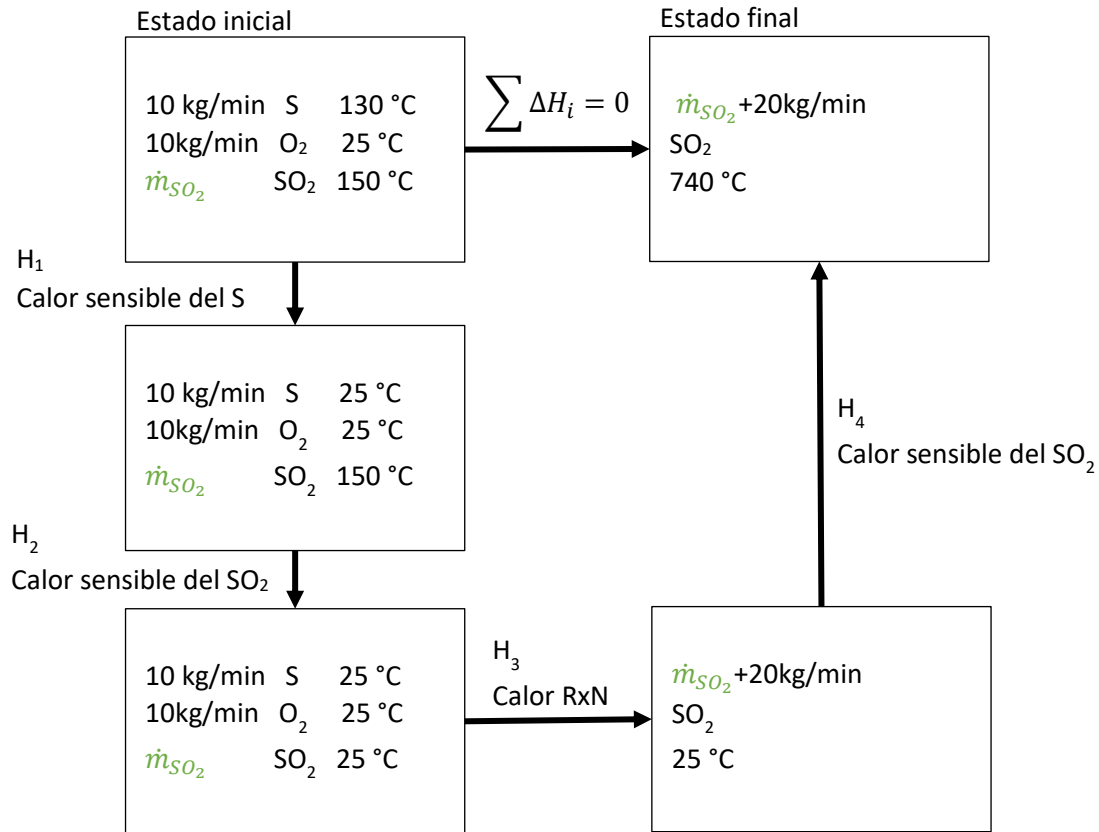


Figura 3.- Planteamiento del balance de energía térmica para el quemador de azufre.

Una vez planteado el balance de energía basándonos en la Ley de Hess, calculamos los calores involucrados.

H₁:

$$\begin{aligned}
 H_1 = & -\dot{n}_S \left[\int_{130^\circ\text{C}+273.15}^{119^\circ\text{C}+273.15} C_{p_{S(l)}} dT - \lambda_{m,S} + \int_{119^\circ\text{C}+273.15}^{95.5^\circ\text{C}+273.15} C_{p_{S(s),\beta}} dT - \lambda_{t,S,\alpha\rightarrow\beta} \right. \\
 & \left. + \int_{95.5^\circ\text{C}+273.15}^{25^\circ\text{C}+273.15} C_{p_{S(s),\alpha}} dT \right] \\
 H_1 = & - \left(10 \frac{\text{kg S}}{\text{min}} \left(\frac{1 \text{ kg mol S}}{32 \text{ kg S}} \right) \right) \left[\int_{130^\circ\text{C}+273.15}^{119^\circ\text{C}+273.15} \left(107.5 - 0.2294 T - 4992000 T^{-2} \right. \right. \\
 & \left. \left. + 0.0001451 T^2 \frac{\text{kcal}}{\text{kg molK}} \right) dT - \left(0.40 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mol}}{1 \text{ kg mol}} \right) \right. \\
 & \left. + \int_{119^\circ\text{C}+273.15}^{95.5^\circ\text{C}+273.15} \left(5.441 \frac{\text{kcal}}{\text{kg molK}} \right) dT - \left(0.096 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mol}}{1 \text{ kg mol}} \right) \right. \\
 & \left. + \int_{95.5^\circ\text{C}+273.15}^{25^\circ\text{C}+273.15} \left(5.441 \frac{\text{kcal}}{\text{kg molK}} \right) dT \right]
 \end{aligned}$$

$$H_1 = 341.12 \frac{\text{kcal}}{\text{min}}$$

H₂:

$$H_2 = -\dot{n}_{SO_2} \left[\int_{150^\circ\text{C}+273.15}^{25^\circ\text{C}+273.15} C_{p_{SO_2(g)}} dT \right]$$

$$H_2 = -\dot{m}_{SO_2} \left(\frac{1 \text{ kg mol } SO_2}{64 \text{ kg } SO_2} \right) \left[\int_{150^\circ\text{C}+273.15}^{25^\circ\text{C}+273.15} \left(10.38 + 0.00254 T - 142000 T^{-2} \frac{\text{kcal}}{\text{kg molK}} \right) dT \right]$$

$$H_2 = \dot{m}_{SO_2} \left(19.86 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } SO_2} \right)$$

H₃:

$$H_3 = -\dot{n}_{SO_2} [(\Delta H_{f,SO_2(g)}^0) - (\Delta H_{f,S(s)}^0 + \Delta H_{f,O_2(g)}^0)]$$

$$H_3 = -20 \frac{\text{kg } SO_2}{\text{min}} \left(\frac{1 \text{ kg mol } SO_2}{64 \text{ kg } SO_2} \right) \left[\left(-70.94 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mol}}{1 \text{ kg mol}} \right) \right. \\ \left. - \left(0 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} + 0 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mol}}{1 \text{ kg mol}} \right) \right]$$

$$H_3 = -20 \frac{\text{kg } SO_2}{\text{min}} \left(\frac{1 \text{ kg mol } SO_2}{64 \text{ kg } SO_2} \right) \left[\left(-70.94 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mol}}{1 \text{ kg mol}} \right) \right]$$

$$H_3 = 22168.75 \frac{\text{kcal}}{\text{min}}$$

H₄:

$$H_4 = -\dot{n}_{SO_2} \left[\int_{25^\circ\text{C}+273.15}^{740^\circ\text{C}+273.15} C_{p_{SO_2(g)}} dT \right]$$

$$H_4 = - \left(\dot{m}_{SO_2} + 20 \frac{\text{kg } SO_2}{\text{min}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg mol } SO_2}{64 \text{ kg } SO_2} \right) \left[\int_{25^\circ\text{C}+273.15}^{740^\circ\text{C}+273.15} \left(10.38 + 0.00254 T \right. \right. \\ \left. \left. - 142000 T^{-2} \frac{\text{kcal}}{\text{kg molK}} \right) dT \right]$$

$$H_4 = - \left(\dot{m}_{SO_2} + 20 \frac{\text{kg } SO_2}{\text{min}} \right) \left(129.32 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } SO_2} \right)$$

$$H_4 = -\dot{m}_{SO_2} \left(129.32 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } SO_2} \right) - 2586.34 \frac{\text{kcal}}{\text{min}}$$

El balance de energía es:

$$H_1 + H_2 + H_3 + H_4 = 0$$

$$341.12 \frac{\text{kcal}}{\text{min}} + \dot{m}_{SO_2} \left(19.86 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } SO_2} \right) + 22168.75 \frac{\text{kcal}}{\text{min}} - \dot{m}_{SO_2} \left(129.32 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } SO_2} \right) - 2586.34 \frac{\text{kcal}}{\text{min}} = 0$$

$$19923.53 \frac{\text{kcal}}{\text{min}} - \dot{m}_{SO_2} \left(109.46 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } SO_2} \right) = 0$$

$$\dot{m}_{SO_2} = \frac{19923.53 \frac{\text{kcal}}{\text{min}}}{109.46 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } SO_2}}$$

$$\dot{m}_{SO_2} = 182.01 \frac{kg SO_2}{min}$$

Actualicemos el esquema del proceso:

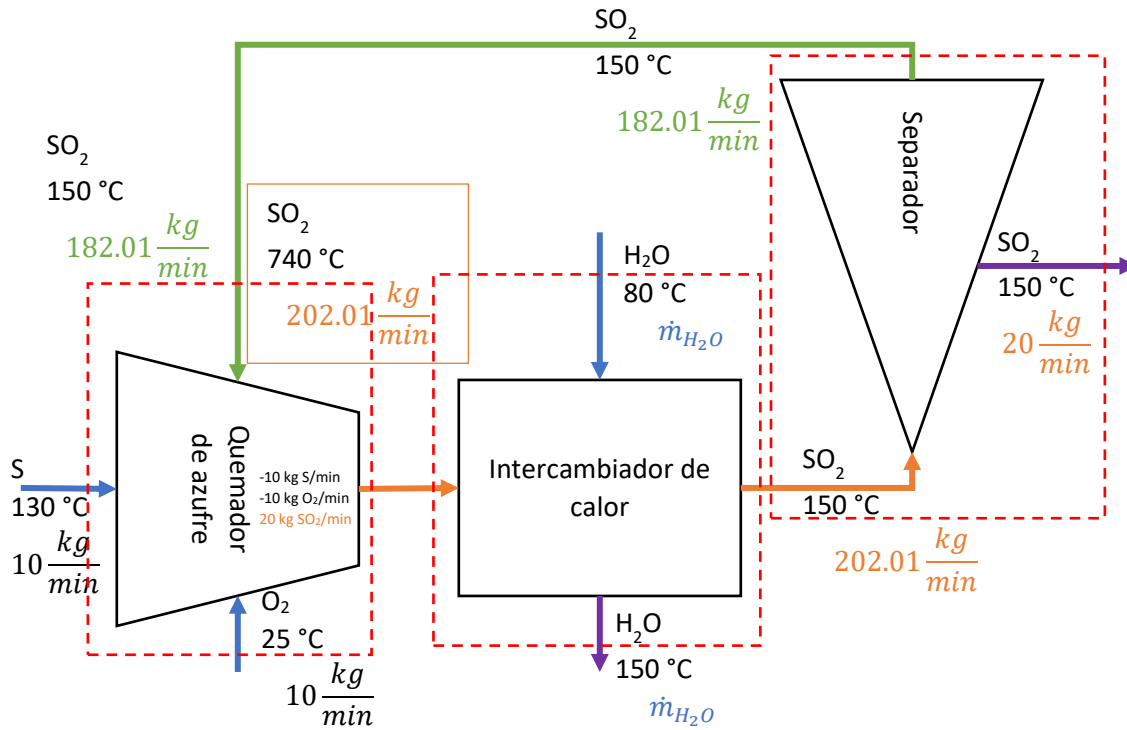


Figura 4.- Esquema del proceso con el flujo de dióxido de azufre calculado.

Procedamos a plantear el balance de energía para el intercambiador de calor:

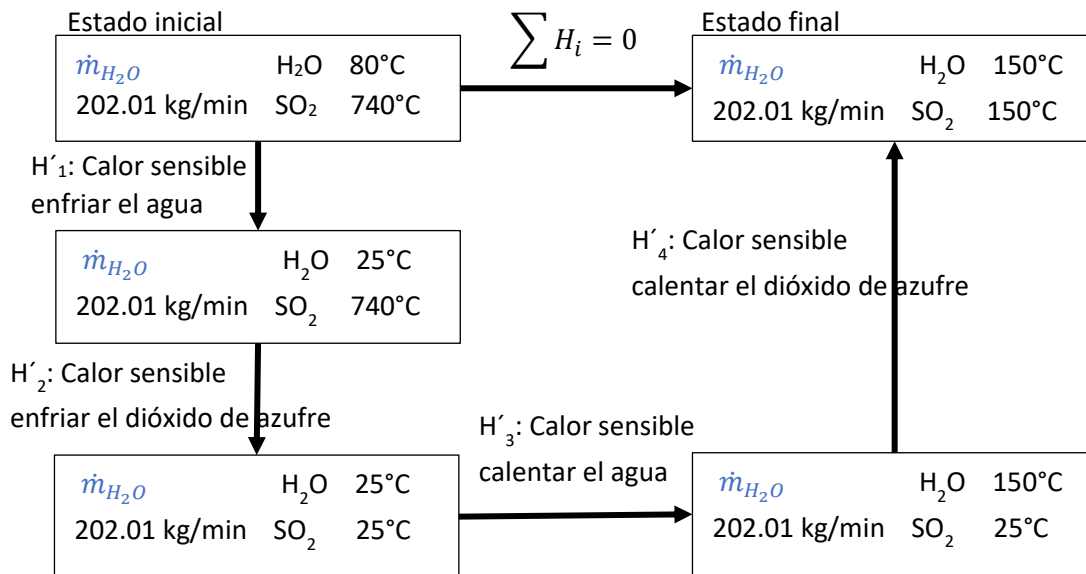


Figura 5.- Planteamiento del balance de energía para el intercambiador de calor.

H'₁:

$$H'_1 = -\dot{n}_{H_2O} \left[\int_{80^\circ C + 273.15}^{25^\circ C + 273.15} C_{p_{H_2O(l)}} dT \right]$$

$$H'_1 = -\dot{m}_{H_2O} \left(\frac{1 \text{ kg mol } H_2O}{18 \text{ kg } H_2O} \right) \left[\int_{80^\circ C + 273.15}^{25^\circ C + 273.15} \left(18.03 \frac{\text{kcal}}{\text{kg molK}} \right) dT \right]$$

$$H'_1 = \dot{m}_{H_2O} \left(55.09 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } H_2O} \right)$$

H'₂:

$$H'_2 = -\dot{n}_{SO_2} \left[\int_{740^\circ C + 273.15}^{25^\circ C + 273.15} C_{p_{SO_2(g)}} dT \right]$$

$$H'_2 = -H_4$$

$$H'_2 = - \left[-\dot{m}_{SO_2} \left(129.32 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } SO_2} \right) - 2586.34 \frac{\text{kcal}}{\text{min}} \right]$$

$$H'_2 = - \left[- \left(182.01 \frac{\text{kg } SO_2}{\text{min}} \right) \left(129.32 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } SO_2} \right) - 2586.34 \frac{\text{kcal}}{\text{min}} \right]$$

$$H'_2 = 26183.87 \frac{\text{kcal}}{\text{min}}$$

H'₃:

$$H'_3 = -\dot{n}_{H_2O} \left[\int_{25^\circ C + 273.15}^{100^\circ C + 273.15} C_{p_{H_2O(l)}} dT + \lambda_{b,H_2O} + \int_{100^\circ C + 273.15}^{150^\circ C + 273.15} C_{p_{H_2O(g)}} dT \right]$$

$$H'_3 = -\dot{m}_{H_2O} \left(\frac{1 \text{ kg mol } H_2O}{18 \text{ kg } H_2O} \right) \left[\int_{25^\circ C + 273.15}^{100^\circ C + 273.15} \left(18.03 \frac{\text{kcal}}{\text{kg molK}} \right) dT + 9.715 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \left(\frac{1000 \text{ mol}}{1 \text{ kg mol}} \right) \right. \\ \left. + \int_{100^\circ C + 273.15}^{150^\circ C + 273.15} \left(7.17 + 0.00256 T + 8000 T^{-2} \frac{\text{kcal}}{\text{kg molK}} \right) dT \right]$$

$$H'_3 = -\dot{m}_{H_2O} \left(637.73 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } H_2O} \right)$$

H'₄:

$$H'_4 = -\dot{n}_{SO_2} \left[\int_{25^\circ C + 273.15}^{150^\circ C + 273.15} C_{p_{SO_2(g)}} dT \right]$$

$$H'_4 = - \left(202.01 \frac{\text{kg } SO_2}{\text{min}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg mol } SO_2}{64 \text{ kg } SO_2} \right) \left[\int_{25^\circ C + 273.15}^{150^\circ C + 273.15} \left(10.38 + 0.00254 T \right. \right. \\ \left. \left. - 142000 T^{-2} \frac{\text{kcal}}{\text{kg molK}} \right) dT \right]$$

$$H'_4 = - \left(202.01 \frac{\text{kg } SO_2}{\text{min}} \right) \left(19.86 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } SO_2} \right)$$

$$H'_4 = -4011.92 \frac{\text{kcal}}{\text{min}}$$

Finalizamos haciendo el balance de energía:

$$H'_1 + H'_2 + H'_3 + H'_4 = 0$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{H_2O} \left(55.09 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } H_2O} \right) + 26183.87 \frac{\text{kcal}}{\text{min}} - \dot{m}_{H_2O} \left(637.73 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } H_2O} \right) - 4011.92 \frac{\text{kcal}}{\text{min}} &= 0 \\ -\dot{m}_{H_2O} \left(582.64 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } H_2O} \right) + 22171.95 \frac{\text{kcal}}{\text{min}} &= 0 \\ \dot{m}_{H_2O} &= \frac{22171.95 \frac{\text{kcal}}{\text{min}}}{582.64 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } H_2O}} \\ \dot{m}_{H_2O} &= 38.05 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{min}} \end{aligned}$$

Para realizar un análisis de la eficiencia térmica del proceso, se puede trazar el diagrama de Sankey del proceso, para lo cual se parte de la Tabla 1:

Tabla 1.- Calores considerados para el diagrama de Sankey

| Reactor | Fuente de calor | Calor (kcal/min) | Calor (%) |
|-------------------------|------------------|------------------|-----------|
| Quemador de azufre | Entradas | | |
| | H ₁ | 341.12 | 1.31 |
| | H ₂ | 3614.72 | 13.84 |
| | H ₃ | 22168.75 | 84.86 |
| | Total | 26124.59 | 100 |
| | Salidas | | |
| | H ₄ | -26183.87 | 100 |
| Total | -26183.87 | 100 | |
| Intercambiador de calor | Entradas | | |
| | H' ₁ | 2096.17 | 7.41 |
| | H' ₂ | 26183.87 | 92.58 |
| | Total | 28280.04 | 100 |
| | Salidas | | |
| | H' ₃ | -24265.63 | 85.81 |
| | H' ₄ | -4011.92 | 14.18 |
| Total | -28277.55 | 100 | |
| Separador | Entradas | | |
| | H'' ₁ | 4011.92 | 100 |
| | Total | 4011.92 | 100 |
| | Salidas | | |
| | H'' ₂ | -3614.72 | 90.10 |
| | H'' ₃ | -397.2 | 9.90 |
| Total | -4011.92 | 100 | |
| Balance | Total | -56.79 | ---- |

En el caso del separador, los calores de entrada y salida corresponden a:

H''₁: El calor sensible de enfriar el flujo de SO₂.

H''₂: El calor sensible de calentar el flujo de SO₂ recirculado.

H''₃: El calor sensible de calentar el flujo de SO₂ abandona el sistema.

Finalmente trazamos el diagrama de Sankey, para realizar un análisis de proceso:

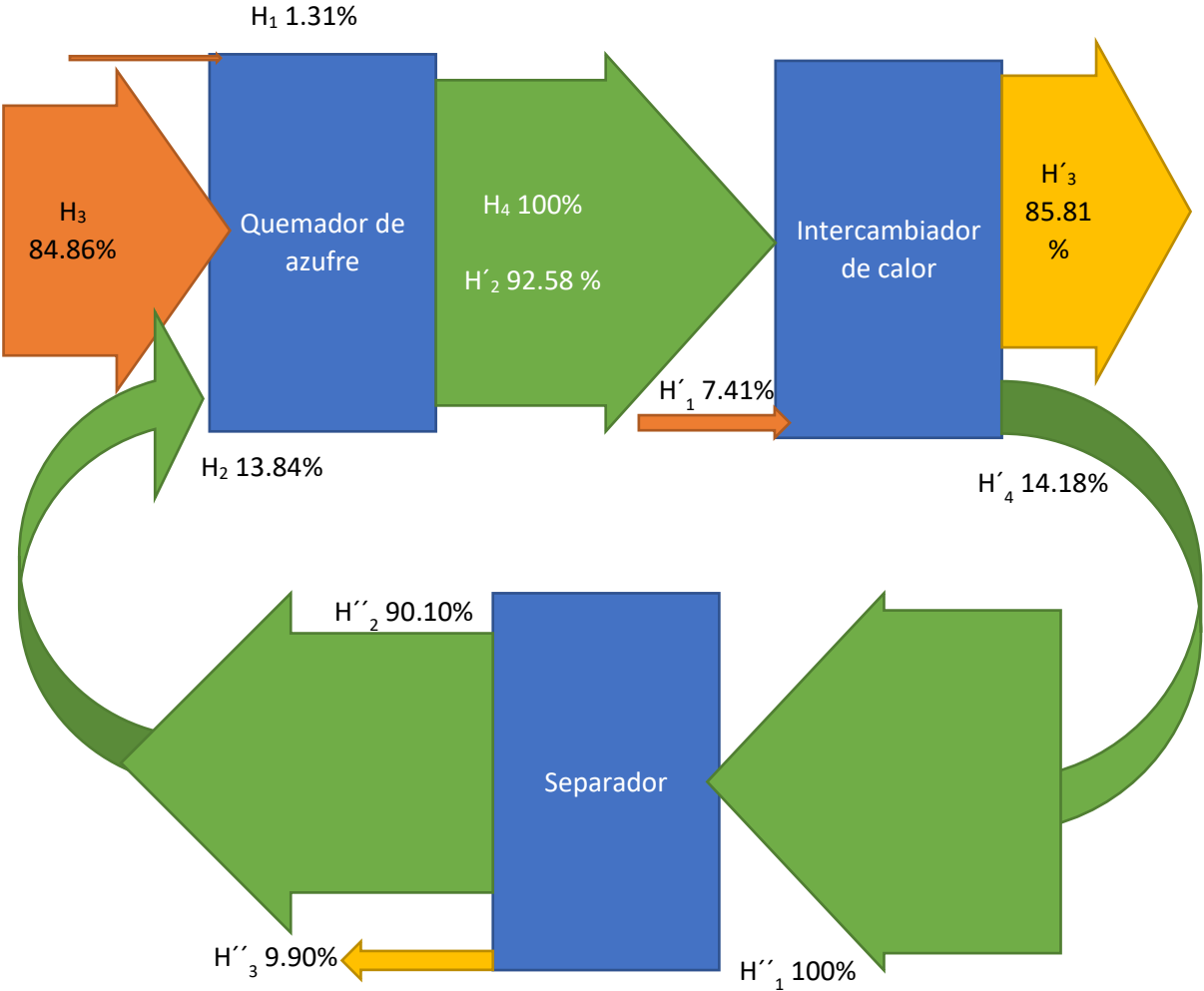


Figura 6.- Diagrama de Sankey del proceso de producción de SO₂.

También colocaremos el diagrama con todos los flujos calculados como referencia.

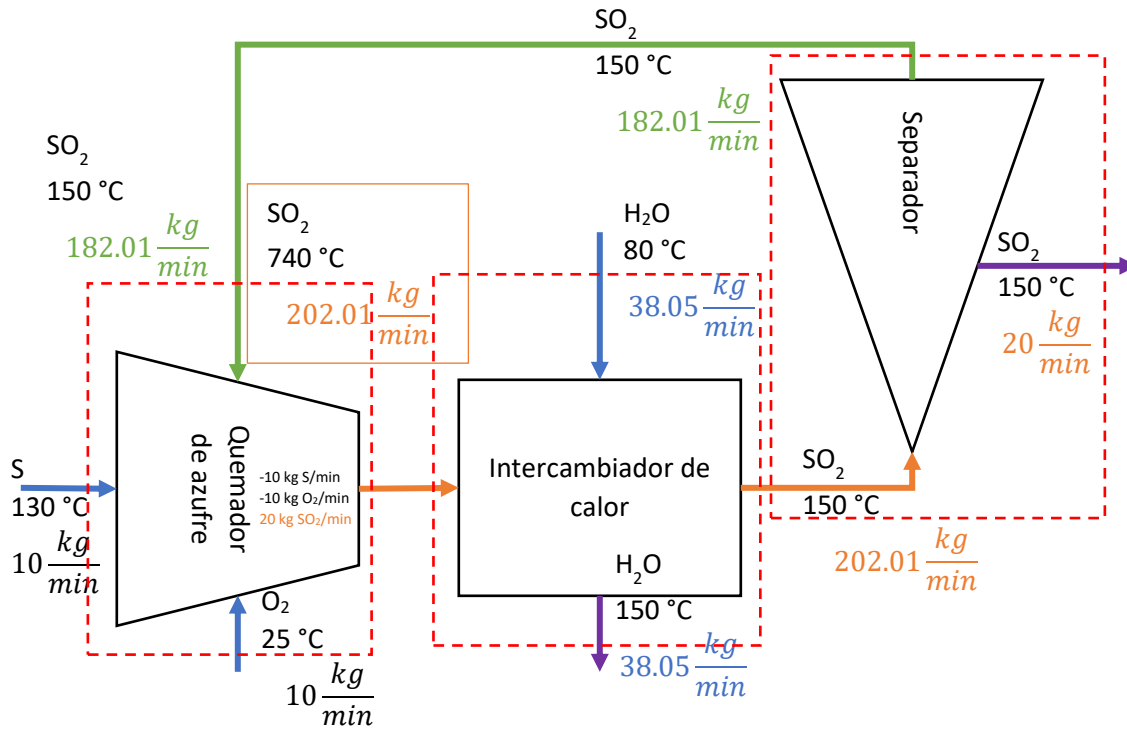


Figura 7.- Esquema del proceso con todos los flujos calculados.